

# Quantitative analysis of the topographic evolution of the Andes of Northern Chile using cosmogenic nuclides

**Doctoral Thesis****Author(s):**

Kober, Florian

**Publication date:**

2004

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005012372>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

DISS ETH NO. 15858

**Quantitative analysis of the topographic evolution of the Andes of  
Northern Chile using cosmogenic nuclides**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH  
for the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES

presented by  
FLORIAN KOBER  
Dipl. Geol. TU Bergakademie Freiberg  
born April, 24, 1975  
Meiningen/Germany

on the recommendation of  
Prof. Dr. Philip Allen, ETH-Zürich, examiner  
Prof. Dr. Rainer Wieler, ETH-Zürich, co-examiner  
Prof. Dr. Fritz Schlunegger, University of Bern, co-examiner  
Dr. Samuel Niedermann, GFZ-Potsdam, co-examiner  
Dr. Susan Ivy-Ochs, ETH-Zürich, co-examiner

Zürich, December, 2004

## Abstract

The evolution of the transient landscape at the Western Escarpment of the central Andes of northern Chile (Arica area) is described for the time interval from ca. 7.5 My ago to present. Base-level lowering with magnitudes of ca. 300-500 m in the Coastal Cordillera and a change in paleoclimate has been modifying a landscape from a geomorphic decay state towards relief growth by incision. Calculated minimum fluvial incision rates increased from ca. 0.2 mm/yr between ca. 7.5 My and 3 My to ca. 0.3 mm/yr thereafter. It is suggested that an incision rate increase was caused by an increase in effective water discharge for drainage systems sourced in the Western Cordillera. During the same time, however, valleys with headwaters in the coastal region lack any evidence of fluvial incision. This implies that the Coastal Cordillera became hyperarid sometime after 7.5 My ago. Furthermore, between 7.5 My and present, the sediment yields have been consistently higher in the catchments with distal sources (ca. 15 m/my) than in the headwaters of rivers with local sources ( $<7$  m/my). The positive correlation between sediment yields and the altitude of the headwaters (distal versus local sources) seems to reflect the effect of orographic precipitation on surface erosion.

A major part of the thesis was dedicated to the study of terrestrial cosmogenic nuclides in quartz ( $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$  and  $^{21}\text{Ne}$ ) to establish exposure duration and erosion rates of surfaces at the Western Andean Escarpment. Dry areas at lower to medium elevations in the Western Escarpment and the Coastal Cordillera (the northern branches of the Atacama Desert) yielded very low erosion rates ( $\leq 100\text{cm/my}$ ). In contrast, the upper Western Escarpment and the adjacent Western Cordillera exhibit steadily increasing erosion rates up to  $\leq 4600\text{cm/my}$ . These areas receive the highest rainfall today. These erosion rates have prevailed for timescales back to the late Miocene for the low erosion surfaces, but are only valid for Holocene/late Pleistocene timescales for the high erosion areas. For the low erosion surfaces, steady-state nuclide concentrations are not achieved, likely due to episodic spalling events or by resetting of nuclide concentrations due major removal of rock (in an m-scale). Nevertheless, erosion rates deduced from single nuclides are equal to values determined with nuclide pairs. For sample sites with low erosion, nuclides reach their steady-state concentrations faster than the landscape itself, which may remain in a transient stage shown by preserved stages of knickzone-headward migration of major streams.

In a side-study, we investigated cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  and  $^{21}\text{Ne}$  in sanidine and cosmogenic  $^3\text{He}$  in Fe-Ti-oxide minerals, coexisting with quartz in the ignimbritic successions of northern Chile. Based on known production rates for quartz, the resulting mean experimental  $^{21}\text{Ne}$  production rate for five sanidine samples is  $30.4 \pm 3.6 \text{ atoms} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$  compared to a modelled value of  $28.3 \text{ atoms} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ . Preliminary results also indicate that sanidine is also well suited for  $^{10}\text{Be}$  studies. The mean experimental  $^{10}\text{Be}$  production rate from two sanidine samples is  $4.45 \pm 0.38 \text{ atoms} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , very close to the modelled value of  $4.55 \text{ atoms} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ . For Fe-Ti-oxide minerals, the mean experimental  $^3\text{He}$  production rate established on five samples is  $120 \pm 11 \text{ atoms} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ , compared to a modelled value of  $121 \text{ atoms} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$ . Model results are provided by I. Leya (University of Bern) and values are based on artificial target experiments and model production rates calculated with new cross sections for  $^3\text{He}$ -,  $^{21}\text{Ne}$ -, and  $^{10}\text{Be}$ -production, respectively, from the individual target elements. Sanidine and Fe-Ti-oxide minerals can thus be added to the list of nuclide-isotope pairs useful in terrestrial cosmogenic nuclide studies.

Quantitative studies of trace impurities in quartz and their effect on terrestrial cosmogenic nuclide production revealed that traces of impurities have no effect on the total nuclide production. Such concentrations at a  $\sim 100$  ppm level were detected in quartz from Chilean ignimbrites in structural bound position and likely also within micro melt-inclusions. The presence of impurities required caution in sample preparation and repeated physical and chemical sample treatment.

Preliminary artificial target experiments on quartz-filled containers, which were exposed during several years at various altitudes and latitudes to constrain existing scaling models of terrestrial cosmogenic nuclides, are presented. The targets contained cosmogenic noble gases, which were, however, compromised by non-cosmogenic (atmospheric, nucleogenic and/or crustal) contributions. These results lead to the development of a new generation of targets at ETH by S. Strasky.

## **Zusammenfassung**

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit bestand in der quantitativen Analyse der Landschaftsentwicklung der Westabdachung Nordchiles im Gebiet um Arica. Die Studie beschränkt sich auf den Zeitraum von ca. 7.5 My bis heute. Hauptursache für die Veränderung der Landschaftsentstehung von einem Zustand der geomorphologischen Einnivellierung hin zu einer wachsenden Topografie mit zunehmendem Relief (um 300-500m), waren eine Absenkung des Niveaus der Flusssysteme sowie eine Veränderung des Paläoklimas. Die daraus resultierenden Einschneideraten der Hauptflüsse waren um die 0.2 mm/y im Zeitraum von ca. 7.5-3 My und stiegen danach auf 0.3 mm/y an. Dieser Anstieg wird verursacht durch eine Zunahme des effektiven Wasserdurchflusses verstärkt, was allerdings nur auf Flüsse mit Einzugsgebiet in der Westlichen Kordillere zutrifft. Zu der selben Zeit weisen die Gebiete der Unteren Westabdachung und der Küstenkordillere keinerlei Anzeichen von fluvialer Erosion auf. Dies lässt vermuten, dass diese Gebiete ab ca. 7.5Ma ein hyperarides Klima hatten.

Weiterhin wurde eine Zunahme der abgeführten Sedimentraten ab ca. 7.5 My festgestellt. Höhere Raten konnten für Einzugsgebiete in den Hochanden (ca. 15 m/my) berechnet werden, verglichen mit lokalen Einzugsgebieten auf der Westabdachung, die geringere Werte aufwiesen (<7 m/my). Diese positive Korrelation von Sedimentabfuhraten mit zunehmender Höhe lässt vermuten, dass die oberflächlichen Erosionsraten eine Funktion der orografisch gesteuerten Niederschlagsmenge sind.

Der Hauptteil der Dissertation befasst sich mit der Analyse von kosmogenen Nukliden in Quarz ( $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$  und  $^{21}\text{Ne}$ ) und der daraus berechneten Oberflächenerosionsraten. Diese korrelieren ebenfalls positiv mit einem orografisch gesteuerten Niederschlag. So sind im Bereich der unteren Westabdachung und der Küstenkordillere (was dem nördlichen Teil der Atacama-Wüste entspricht) äußerst geringe Erosionsraten von  $\leq 100$  cm/my zu verzeichnen. Diese nehmen zur oberen Westabdachung und der Westlichen Kordillere hin konstant zu, auf Werte bis  $\leq 4600$  cm/my. Diese Oberflächenerosionsraten gelten für unterschiedliche Zeiträume. Während die Aussage von sehr geringen Erosionsraten in der Unteren Westabdachung für Zeiträume bis ins späte Miozän gültig ist, sind die höheren Erosionsraten der Westlichen Kordillere für Holozäne/Spät-Pleistozäne Zeiträume nachweisbar. Dabei sind die Nuklidkonzentrationen im Bereich der Atacamawüste meist nicht in Sättigung.

Bei der Analyse der Oberflächenerosionsraten wurde weiterhin festgestellt, dass die Zeiträume für ein Sättigungsgleichgewicht der Nuklidekonzentration unterschiedlich sein

können im Vergleich zur Landschaft als Ganzes. Diese befindet sich wahrscheinlich in einem Übergangsstadium, wie die Knickzonen in den Flussläufen beweisen.

In einer Nebenstudie dieser Dissertation wurden kosmogenes  $^3\text{He}$ ,  $^{10}\text{Be}$  und  $^{21}\text{Ne}$  in den Mineralen Sanidin und Magnetit gemessen. Diese Minerale sind in Paragenese mit Quarzen in den analysierten Ignimbriten aus Nordchile. Basierend auf bekannten  $^{21}\text{Ne}$ -Produktionsraten in Quarz wurden gemittelte  $^{21}\text{Ne}$ -Produktionsraten in Sanidin von  $30.4 \pm 3.6$  Atome $\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$  ermittelt, währenddessen neu modellierte Produktionsraten einen Wert von  $28.3$  Atome $\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$  für Sanidin ergaben. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass kosmogenes  $^{10}\text{Be}$  in Sanidin für die Expositionsdatierung geeignet ist. Dessen vorläufige experimentelle Produktionsrate beträgt  $4.45$  Atome $\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ , bei einer modellierten Produktionsrate von  $4.55$  Atome $\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ . Für  $^3\text{He}$  in Magnetit wurden eine experimentelle Produktionsraten von  $120$  Atome $\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$  ermittelt, die fast identisch verglichen mit der modellierten Produktionsrate von  $121$  Atome $\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$  ist. Die modellierten Produktionsraten von I. Leya (Universität Bern) errechneten sich aus der Verwendung neuer Wirkungsquerschnitte für die einzelnen Elemente, welche an künstlichen Targets gewonnen wurden. Aufgrund der ausserordentlich gut übereinstimmenden Werte von experimentellen und modellierten Produktionsraten sind Sanidin und Magnetit verwendbar in terrestrisch-kosmogenen Nuklidanalysen.

Die quantitative Analyse von Verunreinigungen in Quarz zeigen, dass diese einen vernachlässigbaren Einfluss auf die kosmogene Produktionsraten haben. Dies ist deshalb so, weil die meisten Verunreinigungen im Gitter der Quarze in den nordchilenischen Ignimbriten in der Grössenordnung von  $<100$  ppm waren. Zahlreiche Mikro-Schmelzeinschlüsse beinhalten wahrscheinlich ähnliche Mengen an Verunreinigungen. Während der Einfluss der Verunreinigungen auf die totale Nuklidproduktion vernachlässigbar ist, erforderten diese aber zusätzliche Aufbereitungsschritte während der Probenvorbereitung (z.B. Wiederholung physikalischer Trennmethoden und in der chemischen Auflösungsprozedur).

Ergebnisse von ersten Messreihen an exponierten künstlichen Targets zur Verifizierung von Skalierungsmodellen für die Höhen- und Breitenabhängigkeit der kosmogenen Nuklidproduktion werden präsentiert. Die Targets enthielten eine Mischung aus kosmogenen und nichtkosmogenen (atmosphärischen, nukleogenen und/oder krustalen)

Edelgaskomponenten. Die Testexperimente wurden von S. Strasky and der ETH genutzt, um neue Targets zu konzipieren.